



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie
Zaměření: Materiálové inženýrství

**VZTAH PORÓZITY K AKUSTICKÉMU ÚTLUMU Al a Mg
SLITIN**

**RELATION OF POROSITY AND ACOUSTIC LOSS OF Al
AND Mg ALLOYS**

KMT – B – 165

Zdeněk Cejnar

Vedoucí práce: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Počet stran:..... 49

Počet tabulek:..... 12

Počet obrázků:..... 25

Počet grafů:..... 5

Datum 18.5.2011



Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Katedra materiálů

Vztah porózity k akustickému útlumu
Al a Mg slitin
Zdeněk Cejnar



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum 18. 5. 2011

Podpis



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za odbornou pomoc při utváření této práce, za ochotu a věnovaný čas. Dále bych rád také poděkoval panu Ing. Pavlu Hanusovi, PhD. za pomoc při určení porózity materiálu v programu NIS- Elements.



ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá zkoumáním porózity u slitiny AlSi11. Cílem práce je pomocí nedestruktivní metody ultrazvukové defektoskopie určit vztah porózity a akustického útlumu u Al slitin. K ověření správnosti naměřených hodnot byla použita metoda metalografického výbrusu. Dále se zkoumala struktura vzorků s cílem zjištění jejího vlivu na akustický útlum ultrazvukového paprsku.

KLÍČOVÁ SLOVA: porózita, silumin, ultrazvuková defektoskopie, akustický útlum

ANNOTATION

This bachelor work deals with research of porosity of AlSi11 alloy. The aim of this work is using of non-destructive method of ultrasonic flaw detection to determine the relationship of porosity and acoustic loss of Al alloys. To verify the accuracy of the measured values was used the method of metallographic cuts. The structure of the specimens was also examined due to its influence to acoustic loss.

KEY WORDS: porosity, silumin, ultrasonic defectoscopy, acoustic loss



Obsah

| | |
|--|----|
| Úvod..... | 6 |
| 1 Slitiny hliníku | 7 |
| 1.1 Slévárenské slitiny hliníku..... | 8 |
| 1.1.1 Siluminy Al – Si | 8 |
| 1.2 Tvářené slitiny hliníku..... | 9 |
| 2 Slitiny hořčíku | 11 |
| 3 Porózita ve slitinách hliníku | 12 |
| 3.1 Vznik pórů v odlitcích | 13 |
| 3.2 Vliv rychlosti tuhnutí taveniny na tvorbu pórů | 15 |
| 3.3 Vliv porózity na vlastnosti odlitků | 15 |
| 4 Ultrazvuková defektoskopie..... | 16 |
| 4.1 Útlum ultrazvukových vln | 17 |
| 4.2 Rychlost šíření ultrazvuku | 19 |
| 4.3 Akustický vlnový odpor prostředí | 19 |
| 4.4 Typy akustických vazeb | 20 |
| 4.4.1 Vazba kontaktní..... | 20 |
| 4.4.2 Vazba mezerová | 20 |
| 4.4.3 Vazba imerzní (s předsádkou)..... | 21 |
| 5 Příprava zkoumaných vzorků..... | 23 |
| 6 Měření porózity pomocí ultrazvuku | 25 |
| 7 Struktura měřených vzorků | 34 |
| 7.1 Shrnutí pozorování | 38 |
| 8 Určení porózity metalografickou metodou | 40 |
| 8.1 Příprava vzorků..... | 40 |
| 8.2 Měření porózity | 40 |
| 9 Zkouška tvrdosti vzorků..... | 42 |
| 10 Diskuze..... | 44 |
| Závěr..... | 47 |
| Použitá literatura..... | 48 |



Úvod

Předmětem bakalářské práce je určení vztahu porózity a akustického útlumu u slitin hliníku, tedy určení míry porózity nedestruktivním způsobem. Určení porózity tímto způsobem je výhodné, pokud chceme určit porózu výrobků či polotovarů, aniž by bylo nutné odlitky poškodit.

Porózita je nežádoucí jev, který se snažíme eliminovat. Póry bývají iniciačním místem pro vznik únavových lomů, snižují pevnost a tažnost materiálu, kvalitu obrobených ploch a jejich následnou povrchovou úpravu.

Porózita však nemusí být vždy jevem záporným. Porézní materiál se s výhodou používá například pro výrobu samomazných ložisek či nástrojů.

Měření probíhalo vždy na vzorcích AlSi11, které byly odlity na polské Politechnice Czestochowske katedrou slévárenství a byly připraveny tak, aby jejich porózita byla konstantní.

Pro určení míry porózity byla použita metoda ultrazvukové defektoskopie, kdy se na jednotlivých vzorcích určil jejich akustický útlum a rychlost šíření ultrazvukových vln, z čehož se následně usuzovalo o míře porózity. Zde se vycházelo z předpokladu, že s rostoucí mírou porózity dochází k většímu rozptylu ultrazvukových paprsků a útlum ultrazvuku je tedy vyšší. Další, za předpokladu homogenního rozložení pórů nejpřesnější metodou bylo určení porózity vzorků metalografickou metodou, kdy byla odebrána část materiálu vzorků, která byla zalita do dentakrylu, zbroušena a vyleštěna, nafocena pomocí optického mikroskopu NEOPHOT 32 a porózita byla vypočtena pomocí softwaru optické analýzy obrazu NIS - Elements.

Poslední, destruktivní metoda určení porózity byla použita proto, aby byla zjištěna přesná hodnota porózity jednotlivých vzorků a mohl se tak určit výsledný vztah porózity a akustického útlumu zkoumané slitiny.

Pro ověření správnosti naměřených hodnot porózity dále také sloužily výsledky zaslané panem dr inž Andrzejem Zyskou z Politechniky Czestochovské v Polsku. Zde byla pro určení přesné hodnoty porózity použita metoda hydrostatického vážení vzorků.



1 Slitiny hliníku

Hliník je nepolymorfní kov, který krystalizuje v plošně středěné krychlové soustavě. Měrná hmotnost hliníku je $2\,690 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, teplota tavení je $660\text{ }^\circ\text{C}$, elektrická vodivost se pohybuje v rozmezí $30 - 36 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$. Hliník je nejrozšířenějším kovem v zemské kůře a má druhý největší význam hned po železe.

Hliník povléká tenkou vrstvičkou Al_2O_3 , je tak na vzduchu stálý, protože je tak chráněn před další oxidací. Tento kov také dobře odolává mořské vodě.

Použití hliníku je dáno především jeho dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí, dobrou chemickou odolností, tvárností, velkým množstvím možností úprav povrchu a v neposlední řadě jeho nízkou měrnou hmotností.

Nicméně hliník jako čistý kov má poměrně nízké mechanické vlastnosti. U netvářeného, vyžíhaného hliníku se jeho pevnost v tahu pohybuje pouze okolo 60 Mpa, tažnost je přibližně 25%. Tvářením za studena můžeme dosáhnout pevnosti až 200 Mpa.

Mechanické vlastnosti hliníku můžeme také zlepšit přidáním přísad dalších prvků, jako například Cu, Mg, Mn, Si, Sr a Zn. Proto se nejčastěji používá ve formě slitin s dalšími prvky s odlišnými mechanickými vlastnostmi, což nám přináší celou řadu výhod.

Příměsi těchto prvků ve slitinách zvyšují především pevnost materiálu, vrubovou houževnatost, jeho obrobitelnost, korozivzdornost, tvářitelnost či zabíhavost. Dále můžeme příměsí jako je například lithium využívat také pro snížení hmotnosti výrobků.

Právě nízká hmotnost předurčuje slitiny hliníku k širokému spektru použití, jelikož nízká hmotnost znamená v dnešní době především snížení spotřeby energie, snížení vlivu dynamických účinků výrobků na soustavu, kde jsou použity, což výrazně zvyšuje její životnost či například její přesnost.

Díky dobré pevnosti a nízké hmotnosti pak nacházejí tyto slitiny uplatnění například v leteckém či automobilovém průmyslu, kde dokážou při kolizi díky dobré deformovatelnosti pohltit velké množství energie nárazu a tím minimalizovat následky havárie na posádku.

Dobré elektrické vodivosti se pak využívá v elektrotechnickém průmyslu například pro výrobu kabelů či drátů.



Chemická odolnost hliníku je pak výhodou mimo jiné i v potravinářském průmyslu, kde se používá pro výrobu obalového materiálu – alobalu či v průmyslu chemickém – má dobrou odolnost vůči oxidačním a neutrálním roztokům solí nebo například proti kyselině dusičné. Odolnost vůči zásadám a kyselině sírové je však nízká.

Slitiny hliníku dělíme dle způsobu zpracování na tvářené a slévárenské.

1.1 Slévárenské slitiny hliníku

Slévárenské slitiny hliníku jsou předurčeny pro výrobu tvarových odlitků, které vznikají ať už odlitím do pískových forem, kovových forem nebo vznikají tlakovým litím. Způsob odlití výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti odlitků, maximální pevnost, které lze dosáhnout je zhruba 250 MPa.

Tyto slitiny dále dělíme na podeutektické (obsahují 4,5 – 10% Si), eutektické (10 – 13% Si) a nadeutektické (nad 13% Si). Mezi slévárenské slitiny patří například siluminy (Al - Si), dále pak Al – Si – Mg, Al – Si – Cu, Al – Si – Cu – Ni, Al- Cu či Al – Mg.

Slitiny Al – Mg mají nejvyšší pevnost a houževnatost, nicméně se vyznačují poměrně značnou porózitou, která může vést až k netěsnosti odlitků, dále také horšími slévárenskými vlastnostmi. Pro zlepšení zabíhavosti se přidává křemík, který zároveň zvyšuje hustotu odlitků a zlepšuje tak i jejich těsnost.

Slitiny s niklem a mědí se zas vyznačují dobrou teplotní odolností, mají nízkou teplotní roztažnost a dobré kluzné vlastnosti, které se zvyšují s procentem křemíku ve slitině.

1.1.1 Siluminy Al – Si

Siluminy, tedy slitiny hliníku s křemíkem, patří mezi slévárenské slitiny hliníku. Slévárenské slitiny mají obecně větší obsah přísadových prvků a nečistot v porovnání se slitinami určenými k tvářením. Struktura těchto slitin je heterogenní, je zde obsaženo eutektikum. V důsledku toho jsou mechanické vlastnosti (houževnatost, tvárnost)



slévárenských slitin horší než mechanické vlastnosti slitin určených ke tváření. Korozní odolnost siluminů je však dobrá.

Díky přítomnosti eutektika jsou tyto slitiny dobře tekuté, mají tedy dobrou zabíhavost a málo se smršťují. V porovnání například se slitinami s mědí mají siluminy menší hodnotu roztažnosti v závislosti na teplotě. Jejich měrná hmotnost je také nižší.

Vlivem nízké rozpustnosti křemíku v hliníku nelze tyto slitiny zpracovávat vytvrzováním. Mechanické vlastnosti siluminů se však dají zvýšit očkováním. Očkovadlo se přidává do taveniny těsně před odléváním.

Jako očkovadlo se používá například sodík, který má vliv na snížení teploty eutektické přeměny, krystalizace probíhá tedy za velkého přechlazení (původně 577°C, po naočkování 564°C) a výsledná struktura je jemnozrná a má tedy výrazně lepší mechanické vlastnosti. Například mez kluzu se po naočkování zvýší z původních 140 MPa na 200 MPa, tažnost se zvýší z 3 % na 10 %.

Hořík a měď také výrazně zvyšují pevnost odlitků, tyto slitiny pak lze zpracovávat vytvrzováním.

Podobné účinky jako sodík má i stroncium, které bylo použito pro naočkování zkoumaných vzorků. Stroncium na rozdíl od sodíku po cca dvaceti minutách nevyhoří, ovšem není vhodné pro všechny druhy odlitků.

1.2 Tváření slitiny hliníku

Množství legur v těchto slitinách hliníku se většinou pohybuje do 10%, nepřekročí tak rozsah tuhého roztoku.

Tyto slitiny dělíme na vytvrditelné, zde se tedy dosahuje vyšších pevnostních vlastností vytvrzováním a nevytvrditelné, tedy slitiny se zvýšenou korozní odolností. Mezi vytvrditelné slitiny patří například slitiny Al – Mg a Al – Mn. Mezi nevytvrditelné slitiny pak řadíme třeba slitiny Al – Cu – Mg, Al – Zn – Mg či Al – Mg – Si.

Slitiny Al – Mg se vyznačují výbornou korozní odolností a odolností vůči mořské vodě. Jsou tedy důležitým materiálem pro konstrukci například v chemickém průmyslu či ve strojírenství. Tyto slitiny nezpracováváme vytvrzováním, dá se zde

dosáhnout i při vysoké ochlazovací rychlosti pouze malého stupně přesycení, pevnost se při stárnutí zvýší jen nepatrně.

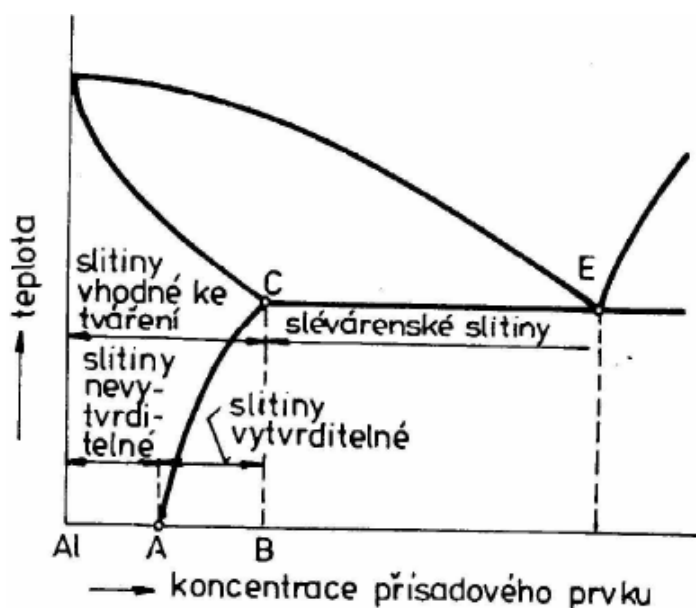
Slitiny Al – Mn zvyšují pevnost, korozní odolnost a tvárnost. Používají se proto jako náhrada čistého hliníku tam, kde je zapotřebí vyšších mechanických vlastností a lepší chemické odolnosti.

Duraly, tedy slitiny Al – Cu – Mg lze na rozdíl od předchozích slitin již vytvrzovat. Po vytvrzení dosahují poměrně dobré pevnosti. Název pochází z latinského duraluminium, tedy tvrdý hliník. Jejich výhodou je přirozené stárnutí, nevýhodou je pak poměrně nízká korozní odolnost. Pro zvýšení chemické odolnosti se duraly povrchově upravují eloxováním, což je proces, kdy se na povrchu vytvoří tenká vrstva oxidu hliníku, povrch je tedy pasivovaný a koroze již dále nepostupuje.

V letectví a ve stavebnictví se pak používají slitiny Al – Mg – Si, které jsou dobře svařitelné, tvárné a mají dobrou korozní odolnost.

Slitiny Al – Zn – Mg – Cu jsou nejpevnějšími slitinami hliníku, Al – Li mají zas srovnatelnou pevnost s duraly při o až 10% nižší hmotnosti. Nevýhoda Al – Li slitin však spočívá ve vysoké reaktivitě lithia, proto musí být tyto slitiny taveny a odlévány v ochranné atmosféře argonu či ve vakuu.

Dělení slitin hliníku si můžeme lépe prohlédnout na rovnovážném diagramu slitin hliníku na obrázku 1.



Obr. 1 Rovnovážný diagram slitin hliníku (obr. 202; Ptáček et kol., 1989)



2 Slitiny hořčíku

Hořčík je nejlehčí z konstrukčních kovů, nicméně především za vysokých teplot je velice reaktivní. Technologie jeho výroby a zpracování je tedy poměrně náročná.

Čistý hořčík se používá jako redukční činidlo při výrobě titanu a dále pak například jako modifikátor při výrobě slitiny s kuličkovým grafitem. Většinou se ale používá právě pro výrobu slitin.

Mezi nejvíce používané hořčíkové slitiny patří například elektrony, tedy slitiny hořčíku, hliníku a zinku, které se vyznačují vysokou pevností při nízké hmotnosti, proto se používají ve velké míře na výrobu tenkostěnných odlitků. Elektrony jsou nicméně omezeny poměrně nízkou teplotou použití, která se pohybuje okolo 150°C. Proto existují další slitiny hořčíku obsahující prvky vzácných zemin (např. thorium, neodym), které umožňují použití těchto slitin při dlouhodobém působení teplot vyšších, až 350°C.

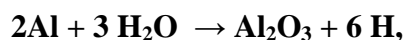
Slitiny hořčíku a lithia jsou ještě lehčí než samotný hořčík, nicméně reaktivita lithia je ještě vyšší než reaktivita hořčíku, proto se tyto slitiny tolik nevyužívají.

V současné době se vývoj hořčíkových slitin ubírá především směrem zvyšování jejich korozní odolnosti a teplotní stability [1, 4].

3 Porózita ve slitinách hliníku

Významný podíl na vzniku porózity ve slitinách hliníku má vodík, který má dostatečnou rozpustnost v tekutém hliníku na to, aby odlitky tímto způsobem ovlivnil.

Hlavním zdrojem vodíku bývá vlhkost v pecní atmosféře. Reakci popisuje rovnice:



kdy při styku roztaveného kovu s vlhkostí v atmosféře dochází k disociaci vody, kyslík reaguje s hliníkem za vzniku oxidu hlinitého a právě vodíku.

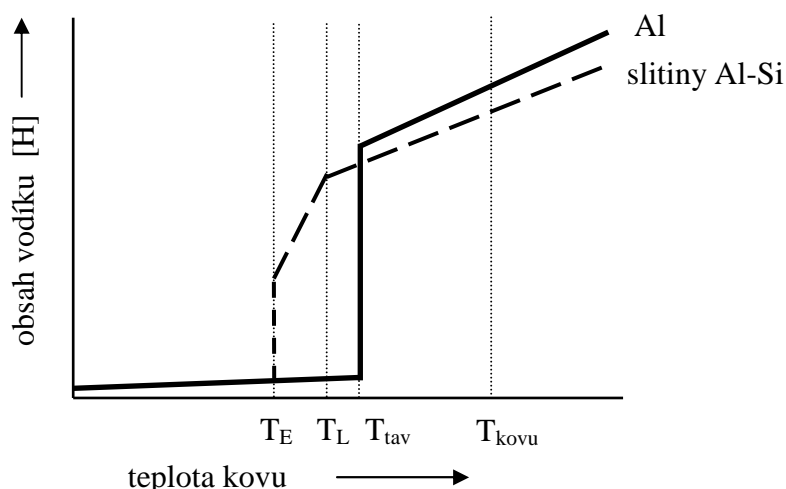
Dalším zdrojem vodíku je vlhkost v nedokonale vysušených rafinačních solích, které jsou hygroskopické, proto musejí být skladovány v suchu a před použitím se vysouší zhruba při teplotě 200°C.

Podstatný vliv na přítomnost vodíku mají také nedokonale vysušené tavicí kelímky, pecní vyzdívky a používané kovové nářadí.

Samotná vsázka může být také podstatným zdrojem vlhkosti. Vodík je zde vázán v pórech na povrchu materiálu a také v hydroxidech, které se vyskytují na zoxidovaném povrchu vsázkového materiálu.

Ze spalných plynů v tavicích a udržovacích pecích vznikají uhlovodíky a vodní pára, tedy další zdroje vodíku, stejně tak jako zamaštěná či jinak znečištěná vsázka apod.

Příčinou vzniku bublin ve slitinách hliníku je snížení rozpustnosti vodíku během tuhnutí taveniny. Závislost rozpustnosti vodíku ve slitinách Al – Si je vidět na obrázku 2.



Obr. 2 Rozpustnost vodíku v hliníku a slitinách Al-Si v závislosti na teplotě (obr. 42; Roučka, 2005)



Parciální tlak vodíku v okolní atmosféře má velký vliv na rozpustnost vodíku ve slitině. Tuto závislost vyjadřuje Sievertsův zákon (tvar pro dvouatomové plyny):

$$S = k \cdot \sqrt{p_{H_2}}$$

Právě této závislosti se v metalurgické praxi využívá při odplyňování taveniny.

Rozpustnost vodíku v tavenině můžeme také snížit přidáním legur jako Zn, Cu, Mn. Naopak Mg, Ca, Li, Ti či Na rozpustnost vodíku zvyšují.

3.1 Vznik pórů v odlitcích

Vodík může být v roztaveném kovu zastoupen v maximálním obsahu, který odpovídá křivce rozpustnosti. Jeho rozpustnost se při ochlazování tekutého kovu snižuje a při překročení meze rozpustnosti uniká vodík z taveniny buď difuzí, nebo tvoří plynové bubliny.

Snížení obsahu vodíku pomocí difuze se nazývá odstátí taveniny. Odstátí probíhá při nízké teplotě, blízké teplotě lící. Po odstátí taveninu rychle přehřejeme na lící teplotu, nedojde tak k opětovnému naplynění. Nicméně snížení obsahu plynu tímto způsobem je pomalé a nedokonalé.

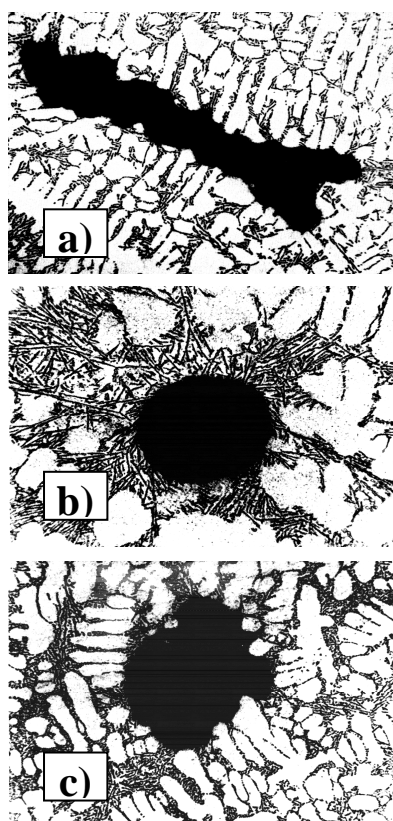
Další možnost redukce obsahu vodíku je odplyňování za sníženého okolního tlaku. Při této metodě jsou v tavenině zřetelně vidět bubliny unikajícího vodíku.

Bubliny plynu vznikají buď homogenní nebo heterogenní nukleací. Při homogenní nukleaci musí být parciální tlak vodíku vyšší než součet tlaku metalostatického, tlaku vyvolaného povrchovým napětím a tlaku atmosférického, což je nepravděpodobné. Proto bubliny vznikají většinou heterogenní cestou. Při heterogenní nukleaci vznikají bubliny pomocí krystalizačního zárodku cizí látky, která není smáčivá taveninou. Tuto podmínku splňují například oxidy, karbidy, boridy či nitridy. Porózita je tedy výrazně spojena právě s přítomností oxidických vměstků v tavenině.

Během tuhnutí taveniny se rozpustnost vodíku prudce snižuje, právě tehdy tedy dochází k tvorbě pórů v odlitcích. Před krystalizací dochází k výraznému obohacení zbytkové taveniny vodíkem. V těchto místech se tedy podstatně zvyšuje hodnota parciálního tlaku vodíku a je podporována nukleace bublin a vzniku pórů.

Další možností vzniku pórů je vliv lokálních tlakových poměrů v oblasti mikrostaženin. Zde se mohou uzavřít malé objemy taveniny, kam se následně nemůže dosazovat tekutý kov, klesá zde tedy tlak a dle Sievertsova zákona se v těchto místech snižuje rozpustnost vodíku a vznikají tak podmínky pro tvorbu plynových bublin.

Porózita je tedy způsobena kombinací bublin a mikrostaženin. Póry od sebe můžeme odlišit podle původu jejich vzniku. Převažuje-li mechanismus vzniku bublin, pak mají póry kulovitý tvar. Pokud převažuje mechanismus mikrostaženin, potom kopírují dendritickou stavbu kovu a jsou tvarově členitější. Póry se většinou vyskytují v mezidendritických oblastech, protože zde tuhne tavenina nejpozději. Čím delší je tedy interval tuhnutí taveniny, tím větší je riziko výskytu dutin. Tvary pórů rozdělené dle původu jejich vzniku vidíme na obrázku 3.



Obr. 3: Tvar pórů ve slitinách hliníku v závislosti na původu vzniku. A) mikrostaženina, B) plynová bublina, C) kombinace plynu a mikrostaženiny (obr. 44; Roučka, 2005)



3.2 Vliv rychlosti tuhnutí taveniny na tvorbu pórů

Rychlost tuhnutí taveniny výrazně ovlivňuje velikost a rozložení dutin. Tuhne-li tavenina pomalu, pak je dostatek času na difuzi vodíku na dlouhé vzdálenosti, ten se shlukuje do větších bublin. Tvar pórů pak není téměř závislý na krystalické struktuře materiálu.

Naopak je tomu při rychlém ochlazování, kdy není čas na difuzní růst vodíkových bublin. Tvoří se tedy pouze malé kulovité či protáhlé bubliny, které jsou uzavřeny v mezidendritických prostorech kovu. Póry vzniklé tímto způsobem nazýváme tedy mikrostaženiny.

Při rychlém ochlazování taveniny dochází k přesycení tuhého kovu, vyloučí se tedy pouze malé množství plynného vodíku a porózita je tím pádem nižší než při rychlém ochlazování. Proto můžeme očekávat větší míru porózity v tlustostěnných odlitcích, které tuhnou delší dobu než odlitky tenkostěnné.

3.3 Vliv porózity na vlastnosti odlitků

Ve většině případů je porózita nežádoucí jev, který se snažíme eliminovat. Póry bývají iniciačním místem pro vznik únavových lomů, snižují pevnost a tažnost materiálu, kvalitu obrobených ploch a jejich následnou povrchovou úpravu.

Póry mají vliv také na těsnost odlitků. Prosakování media skrz odlitek je ve většině případů značně nežádoucí. Nicméně právě propustnosti či nasákavosti porézního materiálu bývá s výhodou využíváno například při výrobě samomazných ložisek či porézních kovových filtrů [6].



4 Ultrazvuková defektoskopie

V zásadě rozeznáváme dvě metody zjišťování vad materiálu ultrazvukem. Jedná se o metodu průchozí a metodu odrazovou. U metody průchozí využíváme dvou sond umístěných proti sobě, přičemž jedna sonda vlnění vysílá a druhá zachycuje tu část vlnění, která prošla materiálem. Použití této metody je omezené tím, že můžeme zkoumat pouze součásti s vhodnými protilehlými povrchy. Další nevýhoda této metody spočívá ve skutečnosti, že pokud se vada nachází daleko od přijímací sondy a její průřez je zároveň menší než průřez svazku vlnění, pak se v určité vzdálenosti za vadou následkem ohybu vlnění utváří akustický stín a tato přijímací sonda přijme stejnou hodnotu signálu jako v místě bez chyby.

Velká výhoda průchozí metody spočívá ovšem v tom, že vlnění se nevrací jako u metody odrazové, tudíž prochází pouze poloviční dráhu a dochází k menšímu útlumu akustického svazku. Proto se tato metoda používá při zkoušení materiálů jako je například guma, tedy materiálů, v kterých dochází k velkému akustickému útlumu.

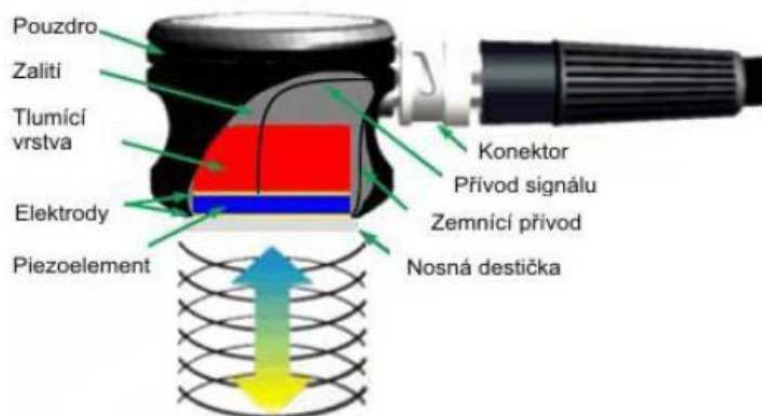
U metody odrazové využíváme snímání ech, tedy odrazů, které vznikají odrazem ultrazvukových impulsů od povrchu předmětu a odrazem od vad v materiálu. U této metody většinou využíváme pouze jednu sondu, která funguje jako vysílač a zároveň jako přijímač, což představuje značnou výhodu v tom, že na zkoušené součásti nepotřebujeme mít dva protilehlé povrchy, jako tomu bylo u metody průchozí. Z doby, než se vrátí odražená vlna, určíme tloušťku zkoušeného materiálu, vzdálenost vady od sondy. Velikost chyby pak odhadneme z velikosti amplitudy odražené vlny. Tloušťka materiálu změřená ultrazvukem ovšem neodpovídá tloušťce reálné, protože její hodnota je snížena v důsledku rozptylu ultrazvukového paprsku o vady uvnitř materiálu.

Tato metoda, na rozdíl od metody průchozí, není vhodná pro testování tenkých plechů. Vysílaný impulz má určité trvání, nemůže být libovolně krátký. Důsledkem toho se u této metody vyskytuje mrtvé pásmo. Tuto oblast můžeme minimalizovat použitím dvojité sondy, ale i zde existuje určitá hranice, zhruba 1 mm, kde je zjišťování vad pomocí ultrazvukové defektoskopie nemožné.

Rozlišovací schopnost této metody závisí na frekvenci. Čím větší požadujeme rozlišovací schopnost, tím musí být menší vlnová délka, tedy vyšší frekvence, aby nedocházelo k splývání ech u blízko ležících vad do jediného. V praxi volíme ovšem

kompromis mezi dostatečnou rozlišovací schopností a malou vlnovou délkou. Platí totiž, že čím menší je vlnová délka, tím dochází k většímu útlumu vlnění v materiálu a nejsme potom schopni prozvučit celou požadovanou hloubku.

Konstrukce ultrazvukové sondy je zobrazena na obrázku číslo 4.



Obr. 4 Konstrukce ultrazvukové sondy

(http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18584)

4.1 Útlum ultrazvukových vln

Útlum ultrazvukových vln závisí na akustických vlastnostech prostředí, jímž vlna prochází. Průchodem vlny prostředím klesá akustický tlak a tím i její energie, dochází tedy k akustickému útlumu ultrazvukové vlny.

Existence útlumu ultrazvukových vln omezuje možnost zjišťování malých vad v materiálu, snižuje rozlišovací schopnost. Negativní vliv útlumu můžeme omezit použitím nižší frekvence. V praxi je proto vhodné zvolit kompromis mezi útlumem a zjistitelností malých vad.

Příčiny útlumu jsou v podstatě dvě. Jedná se o pohlcování vlny prostředím, tzv. pravá absorpce, kdy se mechanická energie mění na energii tepelnou. Druhá příčina pak vychází z nehomogenity látky, díky níž dochází ve zkoušeném materiálu k rozptylu, ohybu, odrazu a lomu procházející vlny. Se stoupající frekvencí klesají ztráty pohlcováním. Ty jsou také výrazně závislé na teplotě.



Součinitel útlumu je potom dán vztahem: $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$,

kde α_1 je útlum pohlcováním,

α_2 je útlum rozptylem.

Součinitel útlumu α se dnes vyjadřuje v $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$. Dříve jsme se mohli setkat s jednotkou neper (Np), která je v současnosti již neplatná. Pro přepočítání platí:

$$1 \text{ dB} = 0,115 \text{ Np}, 1 \text{ Np} = 8,696 \text{ dB}.$$

Pokles akustického tlaku v tenké vrstvě prostředí o tloušťce dl ve vzdálenosti l od počátku, při konstantním útlumu α je dán vztahem: $\frac{dP}{P} = -\alpha dl$,

kde P značí amplitudu akustického tlaku.

Po úpravě dostaneme vztah: $P_1 = P_0 \cdot e^{-\alpha l}$,

kde P_0 značí amplitudu počátečního akustického tlaku,

α – součinitel útlumu.

V tabulce 1 jsou uvedeny příklady útlumů podélných ultrazvukových vln ve vybraných prostředích. Měření bylo prováděno 2 Mhz sondou.

| materiál | útlum α ($\frac{\text{dB}}{\text{mm}}$) |
|-------------------|--|
| hliník | 0,001 – 0,4 |
| ocel feritická | 0,01 – 0,1 |
| ocel austenitická | 0,03 – 0,4 |
| měď | 0,05 – 0,2 |
| olovnaté sklo | 0,002 |
| okenní sklo | 0,006 |
| hořčík | 0,0005 – 0,003 |
| tavený křemen | 0,001 |
| PMMA | 0,5 |
| polystyren | 0,4 |
| voda | 0,0004 |
| glycerin | 0,1 |

Tab. 1 Útlum ultrazvuku ve vybraných prostředích při frekvenci 2 MHz a teplotě 20°C



4.2 Rychlost šíření ultrazvuku

V tuhých látkách je rychlost šíření ultrazvuku pro daný materiál a typ vlnění konstantní. Závisí na Poissonově čísle, modulu pružnosti a měrné hmotnosti. Například pro hliník je rychlost šíření c_1 podélných vln 6320m.s^{-1} , pro feritickou ocel je rychlost šíření 5920m.s^{-1} , pro vodu pak 1483m.s^{-1} .

Rychlost šíření ultrazvuku byla spočtena pomocí vzorce pro praktický výpočet:

$$C_L = 5920 \cdot \frac{L}{L_u}, \text{ viz kapitola 6.}$$

kde L je tloušťka materiálu změřená posuvným měřtkem,

L_u je tloušťka materiálu změřená přístrojem Dio 562.

Z vypočtených hodnot rychlostí pronikání ultrazvuku materiálem můžeme určit také míru porózity. Zde se předpokládalo, že čím vyšší je rychlost pronikání ultrazvuku materiálem, tím nižší bude jeho pórovitost. Toto však popírá graf 4 v kapitole 6, který popisuje vztah porózity a rychlost pronikání ultrazvukových vln materiálem při použití 1MHz, 2MHz a 4 MHz sondy. Pro vztah porózity a rychlosti ultrazvukových vln platí tedy jiný předpoklad, než že čím vyšší je poróznost materiálu, tím nižší je rychlost ultrazvuku.

4.3 Akustický vlnový odpor prostředí

Na akustickém vlnovém odporu neboli akustické impedanci závisí akustický tlak procházejícího vlnění z jednoho prostředí do druhého a akustický tlak odraženého vlnění.

Akustický vlnový odpor je definován jako součin hustoty ρ a rychlost šíření vlny c , tedy vztahem:

$$Z = \rho \cdot c \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

Akustický vlnový odpor prostředí se výrazně uplatňuje při přechodu ultrazvuku rozhraním dvou prostředí, například vody a kovu.



4.4 Typy akustických vazeb

Pro zkoušení materiálu ultrazvukem je nutné vytvoření akustického propojení sondy a zkoušeného materiálu. Zakřivený povrch má podstatný vliv na kvalitu akustické vazby a následně klesá citlivost sondy.

Výplň mezery mezi sondou s piezoelektrickým měničem a testovaným materiálem může být buď kapalná či tuhá, přičemž rozeznáváme 3 druhy akustické vazby a to kontaktní, mezerovou a imerzní. Druh vazby je dán poměrem d_v/λ_v , kde d_v značí tloušťku vazební vrstvy a λ_v je délka vlny.

4.4.1 Vazba kontaktní

Při tomto druhu vazby je sonda v těsném kontaktu s povrchem materiálu, poměr d_v/λ_v je menší než 0,1. Kontaktní vazba se vyskytuje téměř vždy při ručním zkoušení, pokud není použit držák, který vymezí relativní tloušťku d_v/λ_v větší než 0,1. Jako medium zprostředkovávající přenos ultrazvukových vln se používají kapaliny, např. petrolej, olej nebo různé druhy past. Voda jako vazební medium příliš vhodná není pro její nízkou viskozitu a nízkou smáčivost povrchu. Při zkoušení nasákavých materiálů jako je například dřevo, keramika či beton se pak používají pasty či plastelíny. Možné je i využít pevné spojení sádkou.

Tzv. suchá vazba se používá při zkoušení frekvencí nižší než je 1 MHz. Jako vazební prostředí se zde využívá folií z tvárných kovů (např. kadmium), plastu či pryže. Tento druh vazby však potřebuje větší přitlak sondy na testovaný materiál.

4.4.2 Vazba mezerová

U mezerové vazby je poměr d_v/λ_v roven téměř jedné, tedy $d_v \approx \lambda_v$. Například při měření kovových materiálů se jedná o tloušťku od několika desetin milimetru do zhruba dvou milimetrů. Pro dodržení stanovené mezery je při zkoušení použit držák.



4.4.3 Vazba imerzní (s předsádkou)

Právě tento druh akustického propojení ultrazvukové sondy se zkoumaným materiálem byl použit pro určení hodnot prvního a druhého koncového echa u měřených vzorků.

Tento druh vazby se využívá při testování materiálů s hrubým či tvarovaným povrchem. Malé změny tloušťky vazební vrstvy se dají zanedbat vzhledem k tlusté vrstvě předsádky. Platí zde tedy podmínka $d_v \gg \lambda_v$.

Při použití tohoto druhu vazby musí být splněna podmínka:

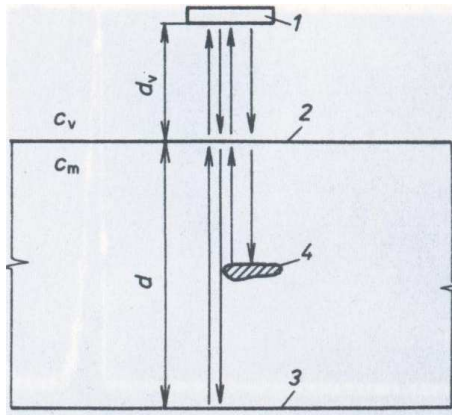
$$d_v > (1,1 - 1,5) \frac{c_v}{c_m} d,$$

kde: d značí tloušťku testovaného materiálu,

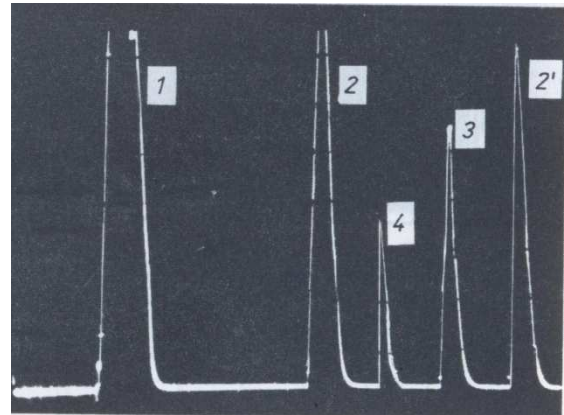
c_v – je rychlost ultrazvuku ve vazební vrstvě – předsádce,

c_m - je rychlost ultrazvuku v materiálu.

Ultrazvukový impuls ze sondy 1 se odrazí od rozhraní 2 předsádky a vrátí se zpět. Časový interval 1 – 2 odpovídá době průchodu vazební vrstvou o tloušťce d_v a rychlosti šíření c_v . Kromě toho část akustického tlaku projde do zkoušeného materiálu o tloušťce d a rychlosti šíření c_m . Odrazí se jednak od dna 3, čímž vznikne koncové echo 3 a jednak od případné vady 4. Kromě toho do sondy přijde dvojnásobné echo 2' od rozhraní 2. Toto echo musí přijít později než koncové echo 3. Vyžaduje se, aby interval 2 – 2' byl o 10 – 50% delší než interval 2 - 3. Je-li tloušťka vrstvy menší, není podmínka splněna. Potom je doba průchodu 2 - 2' kratší než 2 – 3 a echo 2' je na místě, kde se může očekávat vadové echo 4. (Obraz, 1989, s. 208) Tuto cestu ultrazvukového impulsu a zobrazení jednotlivých ech na stínítku přístroje vidíme na obrázku 5 a 6 [2, 3, 5, 8].



Obr. 5 Cesta ultrazvukového impulsu
materiálem (obr. 7.4; Obraz, 1989)



Obr. 6 Sled ech při uspořádání prostředí
dle obr. 5 (obr. 7.5; Obraz, 1989)



5 Příprava zkoumaných vzorků

Vzorky byly odlity katedrou slévárenství na Politechnice Czestochowske v Polsku.

Pro přípravu vzorků byla použita normalizovaná slitina AlSi11. Chemické složení této slitiny je uvedeno v tabulce 2.

| slitina | chemické složení [%], zbytek je Al | | | | | | |
|---------|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| AlSi11 | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ti |
| | 10,0 | 0,15 | 0,03 | 0,10 | 0,45 | 0,07 | 0,15 |
| | 11,8 | | | | | | |

Tab. 2 Chemické složení normalizované slitiny AlSi11

Tavení materiálu probíhalo v kelímkové indukční peci PIT 50s/400. Materiál byl roztaven a přehřán na teplotu 700°C, následně byl vléván pomocí lžíce do spodní poloviny formy o rozměrech 200x100x50 mm. Forma byla připevněna na hydraulickém lisu PHM – 250C, byla temperována na 150°C a na její povrch byla nanesena ochranná vrstva z koloidního grafitu, která měla za úkol zabránit přichycení taveniny k formě. Následně byl spuštěn lisovací razník, forma se uzavřela a probíhalo lisování. Vznikly tedy odlitky o rozměrech 200x100x25 mm. Tlak na odlitek působil 50 sekund. Po této době razník přestal vyvíjet tlak na formu a odlitek byl vyhozen pomocí čtyř vyhazovačů umístěných v rozích formy. Odlitky byly připravené dvojím způsobem, pod tlakem 60 MPa a metodou gravitační, vždy při teplotě formy kolem 150°C.

Další odlitky byly připravené ze slitiny modifikované stronciem, AlSr10 s množstvím 0,05% Sr. Modifikující prvek byl přidán do slitiny po jejím přehřátí na 730°C, následně byla připravena lázeň o stejné teplotě, do které se slitina na 10 minut ponořila s cílem homogenizace chemického složení. Z takto zpracovaného kovu byly připravované vzorky při stejných podmínkách jako při přípravě vzorků z nemodifikované slitiny.

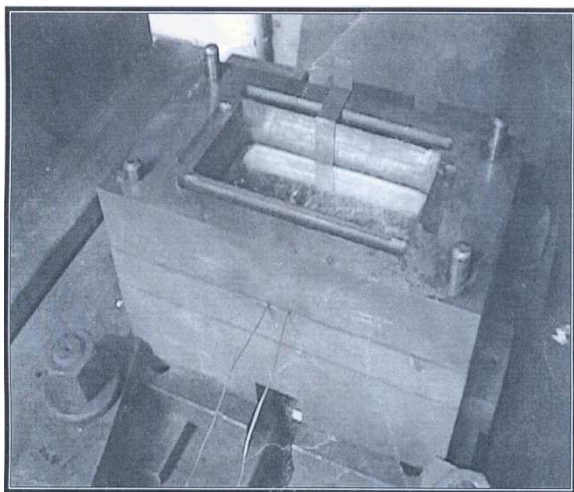


V tabulce č. 3 je uvedeno označení vzorků a způsob jejich přípravy. Pro měření byly vybrány vzorky ze střední části odlité desky (s označením W) a z okrajové části odlité desky (označení Z).

| označení vzorku | místo odebrání vzorku | stav slitiny AlSi11 | | obsah modifikátoru [%] |
|-----------------|-----------------------|---|--|------------------------|
| 1W | střed | nemodifikovaný, odlévaný gravitačně | | – |
| 1Z | okraj | | | |
| 2W | Střed | Nemodifikovaný, odlévaný pod tlakem 60MPa | | – |
| 2Z | Okraj | | | |
| 3W | střed | modifikovaný, odlévaný gravitačně | | 0,05 |
| 3Z | okraj | | | |
| 4W | střed | modifikovaný, odlévaný pod tlakem 60MPa | | 0,05 |
| 4Z | okraj | | | |

Tab. 3 Přehled stavu odlitků a jejich označení

Na obrázku č. 7 je zobrazena forma použitá k výrobě vzorků.



Obr. 7 Forma použitá k odlití zkoumaných vzorků

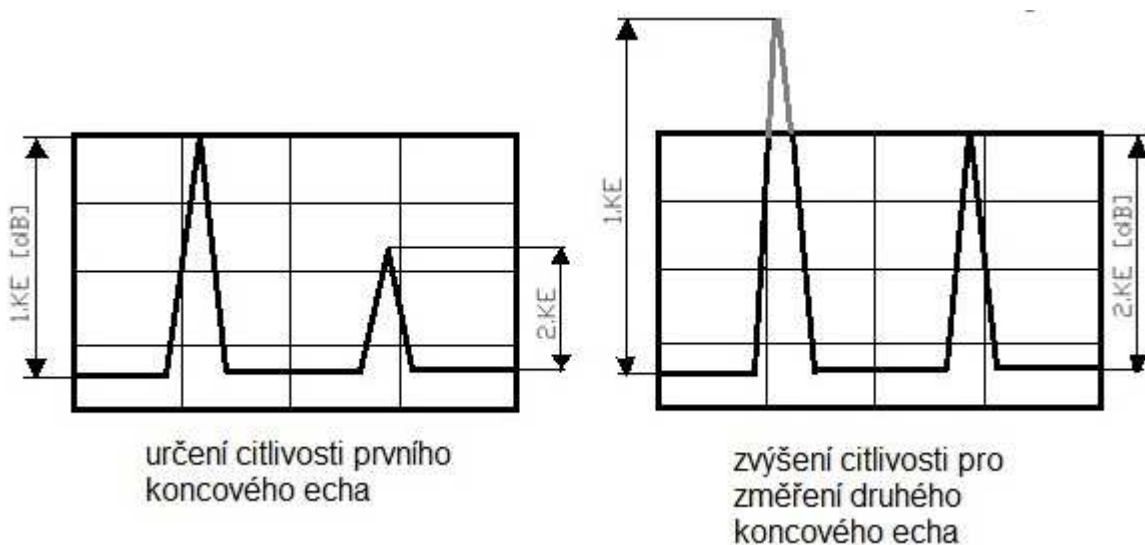


6 Měření porózity pomocí ultrazvuku

Pro určení míry porózity byla použita odrazová metoda zjišťování vad materiálu. Pracovalo se tedy s dvojími sondami, které sloužily jako vysílač a zároveň jako přijímač. Sonden byly připojeny k přístroji DIO 562. Kalibrace sond probíhala na měřce typu K1 z oceli v níž se ultrazvukové vlny šíří rychlostí 5920 m/s. Kalibrování bylo prováděno na rozměru 20 mm, tedy na rozměru nejbližšímu rozměru měřených vzorků. Sonden byly celkem čtyři, přičemž první měření probíhalo sondou typu Olympus Parametrics DHC 703, 1,0 MHz / 5“, 679773 na frekvenci 1 MHz s průměrem měniče 13,5 mm. Druhé měření probíhalo sondou typu PQ 2/10 – 2C, 04.263 o frekvenci 2 MHz s průměrem měniče 7 mm, třetí měření bylo prováděno sondou s frekvencí 4 MHz, průměr měniče byl 10 mm. Poslední měření bylo prováděno sondou typu SM1 344 o frekvenci 10 MHz s měničem o průměru 6 mm přičemž většina hodnot při tomto posledním měření byla odhadnuta, hodnoty ech byly mimo měřící rozsah přístroje. Jako vazebné prostředí mezi sondou a měřenými vzorky byla použita voda.

Měření bylo prováděno s cílem určit míru porózity u jednotlivých vzorků, tedy zjistit akustický útlum a rychlost ultrazvukových vln ve vzorcích.

Při měření postupujeme tak, že nejdříve zvolíme takovou citlivost ultrazvuku, aby první koncové echo vyplnilo celý rastr obrazovky přístroje, odečteme tedy hodnotu KE1. Druhé koncové echo najdeme ve zhruba dvojnásobné vzdálenosti od prvního echa. Zvětšíme tedy citlivost ultrazvuku tak, aby i druhé koncové echo vyplnilo celý rastr obrazovky přístroje a odečteme hodnotu KE2. Postup odečítání je znázorněn na obrázku 8.



Obr. 8 Postup odečítání ech na přístroji DIO 562

Hodnotu akustického útlu následně určíme ze vztahu:

$$\alpha = \frac{2KE - 1KE}{2 \cdot L_u} \quad (1)$$

kde: 2KE značí hodnotu druhého koncového echa v decibelech,

1KE je hodnota prvního koncového echa v decibelech,

L_u je tloušťka zkoušeného materiálu v metrech.

Přesto, že by vzorky měly být v celém svém průřezu homogenní, tak se naměřené hodnoty koncových ech lišily při měření u kraje vzorku a při měření v tepelné ose. Proto bylo měření prováděno právě v tepelné ose vzorku.

U každého vzorku probíhalo měření vždy na dvou místech, dva centimetry od pravého či levého okraje, uprostřed vzorku, přičemž pozice měření jsou proti sobě pootočený o 90°. Místa měření jsou naznačena na obrázku číslo 9.



Obr. 9 Poloha přiložení ultrazvukové sondy

Velikosti takto naměřených hodnot koncových ech a hodnoty spočítaného akustického útlumu dle vztahu 1 jsou uvedeny v tabulkách 4, 5, 6 a 8 a závislost akustického útlumu na procentu porózity je uvedena v grafech 1 – 3, přičemž předpokladu rostoucího akustického útlumu s mírou porózity nejlépe odpovídá graf 3 a měření s 4MHz sondou, kdy bylo dosaženo vhodné rozlišovací schopnosti při použití odrazové metody měření ultrazvukovým paprskem.

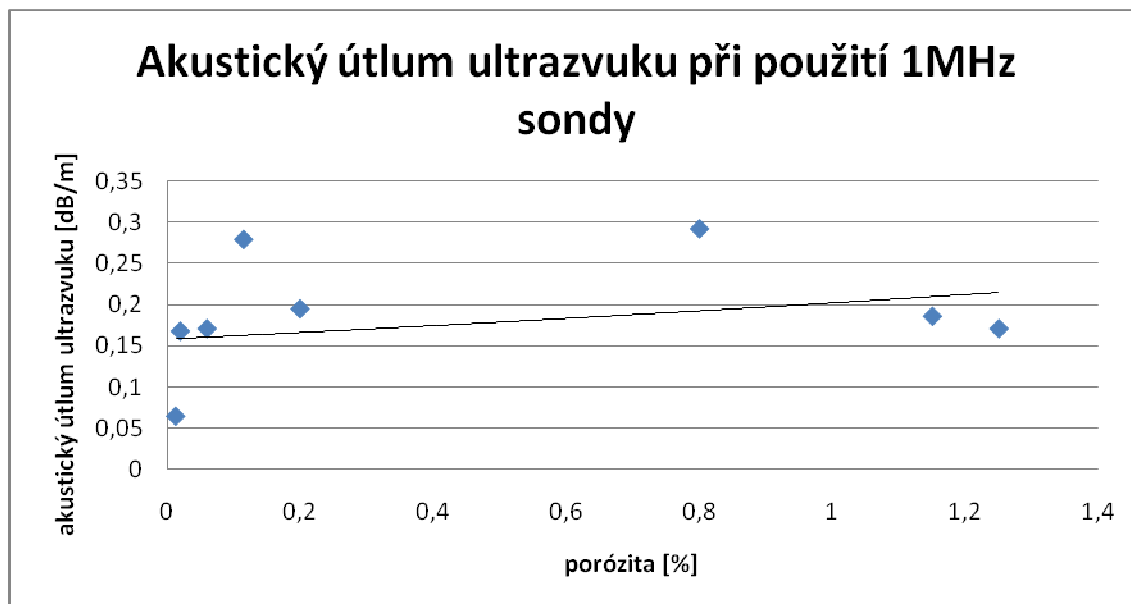
Pro tvorbu grafů byl použit průměr hodnot akustického útlumu na místě měření 1 a 2 a průměrná hodnota porózity.

Pro stanovení vztahu mezi porózitou a akustickým útlumem bylo použito měření s 4MHz sondou, kde naměřené hodnoty akustického útlumu nejlépe odpovídají předpokladu, že čím vyšší je porózita vzorku, tím vyšší bude hodnota akustického útlumu ultrazvukového paprsku.



| vzorek | místo 1 | | útlum α [$\frac{dB}{m}$] | místo 2 | | útlum α [$\frac{dB}{m}$] |
|--------|----------|----------|-----------------------------------|----------|----------|-----------------------------------|
| | KE1 [dB] | KE2 [dB] | | KE1 [dB] | KE2 [dB] | |
| 1W | 48,4 | 54,6 | 0,171 | 42,6 | 48,6 | 0,165 |
| 1Z | 44,7 | 51,7 | 0,195 | 42,4 | 50,1 | 0,215 |
| 2W | 41,2 | 47,6 | 0,179 | 42,2 | 48,3 | 0,168 |
| 2Z | 42 | 46,4 | 0,127 | 41,2 | 47,4 | 0,171 |
| 3W | 41,4 | 47,4 | 0,165 | 42,4 | 49,2 | 0,186 |
| 3Z | 47 | 57,6 | 0,292 | 41,3 | 47,4 | 0,175 |
| 4W | 41,2 | 43,4 | 0,065 | 41,9 | 48,4 | 0,179 |
| 4Z | 44,7 | 43,9 | -0,023 | 42,6 | 52,7 | 0,279 |

Tab. 4 Hodnoty naměřených koncových ech a vypočteného akustického útlumu s použitím 1 MHz sondy

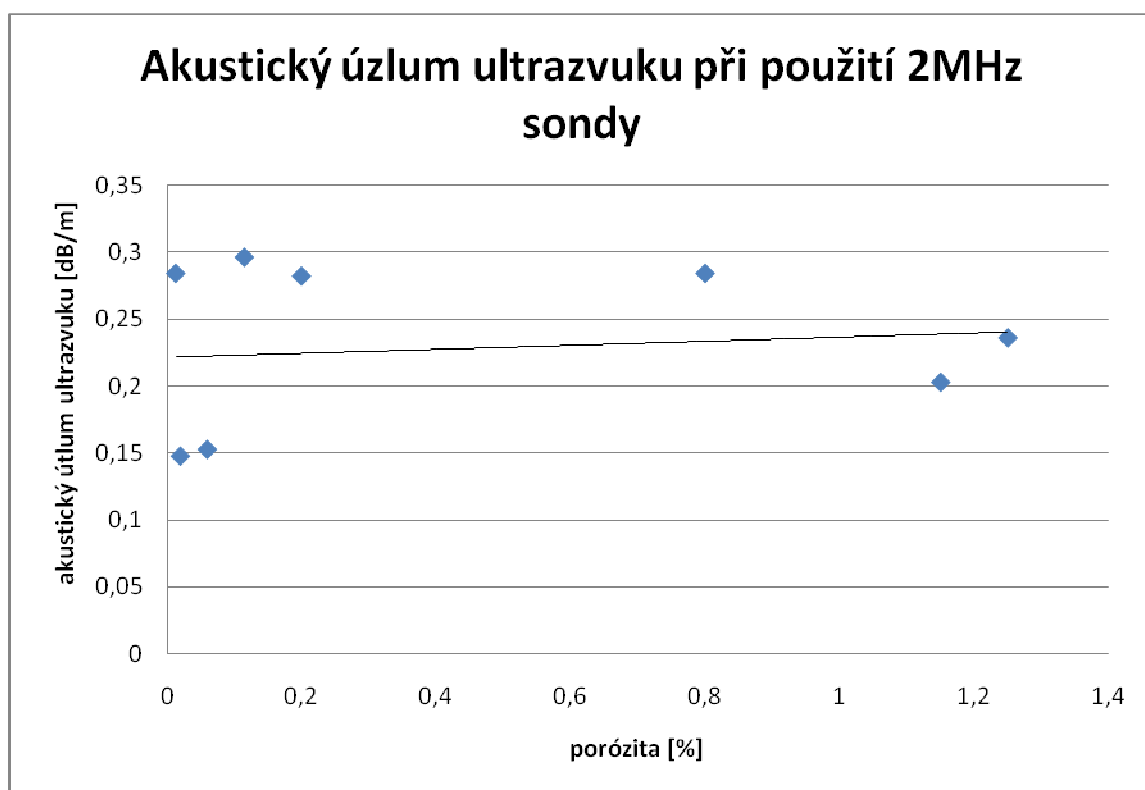


Graf 1 Závislost akustického útlumu na procentu porózity, měřeno 1MHz sondou



| vzorek | místo 1 | | útlum α [$\frac{dB}{m}$] | místo 2 | | útlum α [$\frac{dB}{m}$] |
|--------|----------|----------|-----------------------------------|----------|----------|-----------------------------------|
| | KE1 [dB] | KE2 [dB] | | KE1 [dB] | KE2 [dB] | |
| 1W | 61,5 | 69 | 0,209 | 54,7 | 63 | 0,236 |
| 1Z | 53,5 | 62,2 | 0,244 | 50,2 | 60,2 | 0,282 |
| 2W | 51,3 | 58,8 | 0,211 | 53,8 | 59,1 | 0,148 |
| 2Z | 50,6 | 60,1 | 0,265 | 50,6 | 56,1 | 0,153 |
| 3W | 54,5 | 61,7 | 0,203 | 54 | 60,3 | 0,176 |
| 3Z | 51,3 | 61,4 | 0,284 | 53,5 | 59,8 | 0,183 |
| 4W | 51,2 | 63,3 | 0,348 | 50,8 | 60,9 | 0,284 |
| 4Z | 52,5 | 55,2 | 0,078 | 50,9 | 61,5 | 0,296 |

Tab. 5 Hodnoty naměřených koncových ech a vypočteného akustického útlumu s použitím 2 MHz sondy

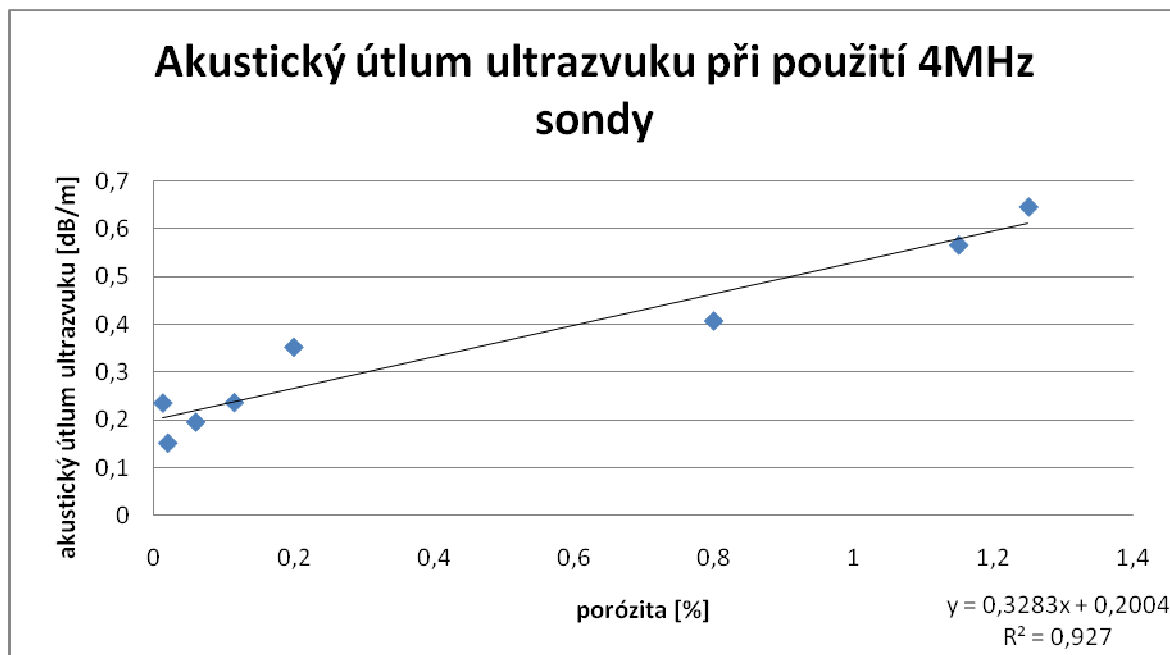


Graf 2 Závislost akustického útlumu na procentu porózity, měřeno 2MHz sondou



| Vzorek | místo 1 | | útlum α [$\frac{dB}{m}$] | místo 2 | | útlum α [$\frac{dB}{m}$] |
|--------|----------|----------|-----------------------------------|----------|----------|-----------------------------------|
| | KE1 [dB] | KE2 [dB] | | KE1 [dB] | KE2 [dB] | |
| 1W | 33 | 50,1 | 0,477 | 34,4 | 57,4 | 0,646 |
| 1Z | 27,3 | 43 | 0,446 | 23,2 | 35,7 | 0,352 |
| 2W | 24,4 | 37,6 | 0,371 | 48,9 | 54,2 | 0,151 |
| 2Z | 20,7 | 29,4 | 0,245 | 20,7 | 28,1 | 0,195 |
| 3W | 39,1 | 59 | 0,567 | 41,6 | 61,2 | 0,566 |
| 3Z | 27,2 | 44,9 | 0,500 | 27,3 | 41,9 | 0,407 |
| 4W | 19,6 | 30,7 | 0,320 | 23 | 31,4 | 0,235 |
| 4Z | 30,3 | 39,4 | 0,263 | 24,7 | 33,1 | 0,236 |

Tab. 6 Hodnoty naměřených koncových ech a vypočteného akustického útlumu s použitím 4 MHz sondy



Graf 3 Závislost akustického útlumu na procentu porózity, měřeno 4MHz sondou

Tomuto vztahu akustického útlumu a porózity nejlépe odpovídá lineární rovnice $y = 0,328x + 0,2004$, která má řešení ve tvaru:

$$x = \frac{y - 0,2004}{0,328} \quad (2)$$

Pokud dosadíme za y hodnotu akustického útlumu, vyjde tedy příslušná hodnota porózity.



Hodnoty teoretické porózity vypočtené dle vztahu 2 při měření 4MHz sondou jsou uvedeny v tabulce číslo 7. Při porovnání skutečné a teoreticky spočítané porózity se její hodnota liší v průměru o 0,11%. Koeficient korelace má hodnotu $R = 0,963$.

| označení vzorku | metalograficky naměřená porózita (průměr) | teoreticky vypočtená porózita | absolutní odchylka naměřené a spočítané porózity |
|-----------------|---|----------------------------------|--|
| 1W | 1,25 | 1,36 | 0,11 |
| 1Z | 0,2 | 0,46 | 0,26 |
| 2W | 0,02 | 0,15 | 0,17 |
| 2Z | 0,06 | 0,02 | 0,08 |
| 3W | 1,15 | 1,12 | 0,03 |
| 3Z | 0,8 | 0,63 | 0,17 |
| 4W | 0,013 | 0,10 | 0,09 |
| 4Z | 0,115 | 0,11 | 0,01 |
| | | | $\Phi = 0,11\%$ |

Tab. 7 Porovnání hodnot teoreticky spočítané porózity dle vztahu 2 při měření 4MHz sondou a hodnot zjištěných metalograficky

| Vzorek | místo 1 | | útlum α [$\frac{dB}{m}$] | místo 2 | | útlum α [$\frac{dB}{m}$] |
|--------|-------------|-------------|--------------------------------------|-------------|-------------|--------------------------------------|
| | KE1 [dB] | KE2 [dB] | | KE1 [dB] | KE2 [dB] | |
| 1W | neměřitelné | neměřitelné | neměřitelné | neměřitelné | neměřitelné | neměřitelné |
| 1Z | 89 | 96 | 0,194 | 84 | 95 | 0,306 |
| 2W | 86 | 95 | 0,245 | 86 | 95 | 0,246 |
| 2Z | 76 | 92 | 0,423 | 80 | 92 | 0,328 |
| 3W | neměřitelné | neměřitelné | neměřitelné | neměřitelné | neměřitelné | neměřitelné |
| 3Z | 89 | 96 | 0,184 | 89 | 96 | 0,191 |
| 4W | 77 | 89 | 0,330 | 84 | 92 | 0,217 |
| 4Z | 79 | 87 | 0,229 | 88 | 95 | 0,183 |

Tab. 8 Hodnoty naměřených koncových ech a vypočteného akustického útlumu s použitím 10 MHz sondy



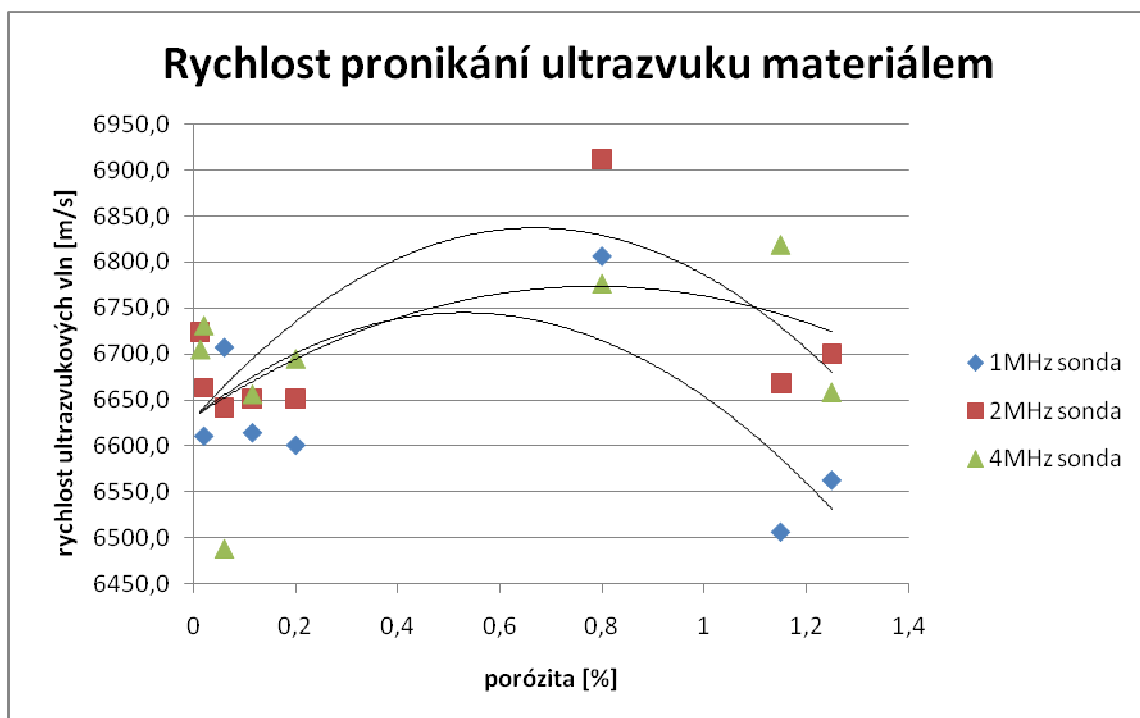
Hodnoty naměřené 10 Mhz sondou uvedené v tabulce číslo 8 je třeba brát s rezervou, protože přístroj DIO 562 lze nastavit na maximální zesílení 80 dB. Všechny hodnoty uvedené v tabulce 8, které tuto mez překročily, byly tedy odhadnuty.

Dále se měřila rychlost pronikání ultrazvukových vln materiálem. Hodnoty vypočtené rychlosti ultrazvuku ve zkoumaných vzorcích dle vzorce pro praktické použití $CL = 5920 \cdot \frac{L}{Lu}$ při frekvenci 1, 2 a 4MHz jsou uvedeny v tabulce 9.

| označení vzorku | $C_{L1MHz} [m.s^{-2}]$ | $C_{L2MHz} [m.s^{-2}]$ | $C_{L4MHz} [m.s^{-2}]$ |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1W | 6563,27 | 6700,35 | 6658,73 |
| 1Z | 6601,43 | 6651,48 | 6694,99 |
| 2W | 6611,32 | 6662,99 | 6731,26 |
| 2Z | 6707,74 | 6641,43 | 6488,79 |
| 3W | 6506,85 | 6667,80 | 6818,94 |
| 3Z | 6807,06 | 6912,33 | 6776,74 |
| 4W | 6724,98 | 6723,62 | 6705,31 |
| 4Z | 6615,07 | 6651,68 | 6656,65 |

Tab. 9 Vypočtená rychlost šíření podélných ultrazvukových vln

Závislost porózity a rychlosti pronikání ultrazvukových vln u zkoumaných vzorků zobrazuje graf číslo 4.



Graf 4 Závislost rychlosti pronikání ultrazvukových vln na porózitě materiálu AlSi11

Vztah porózity a rychlosti šíření ultrazvukových vln u zkoumaných vzorků tedy neodpovídá předpokladu, že čím vyšší je porózita vzorků, tím nižší bude rychlost ultrazvukových vln.

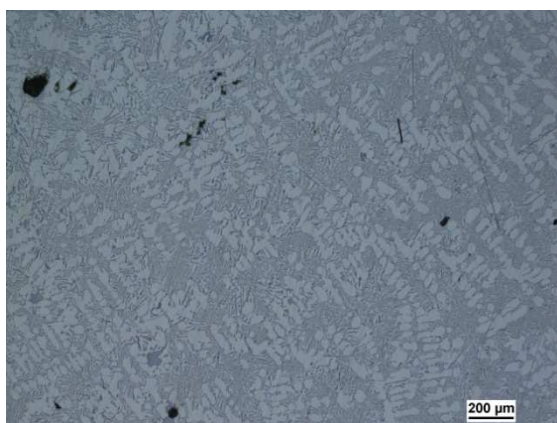


7 Struktura měřených vzorků

U měřených vzorků byla dále zkoumána jejich struktura, aby se zjistilo, jakou měrou mohla ovlivnit útlum ultrazvukových vln či elektrickou vodivost u jednotlivých vzorků.

Snímky jednotlivých vzorků byly vytvořeny na optickém mikroskopu EPIPHOT 200 (NIKON) osazeném digitální kamerou DS-5M-U1 (NIKON). Snímky jednotlivých vzorků jsou vidět na obrázku 10 – 25. Všechny vzorky byly snímány v polarizovaném světle, aby struktura vynikla co nejlépe.

U vzorku 1W (obr. 10, 11) vidíme eutektikum ve tvaru jehlic, čímž se liší od všech ostatních zkoumaných vzorků, kde se vyskytuje většinou eutektikum tečkovité. Dendrity u tohoto vzorku vykazují hrubší strukturu než u vzorku 1Z (obr. 12)

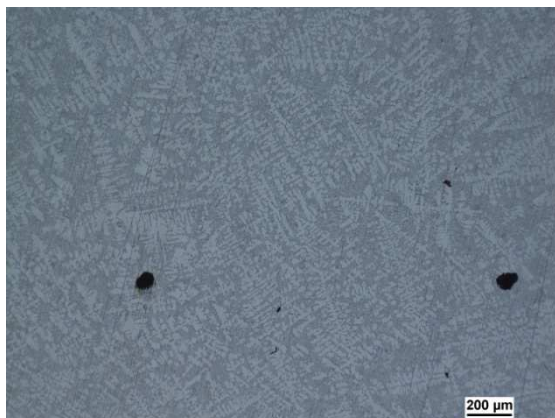


Obr. 10 Vzorek 1W, 50x zvětšeno, PL

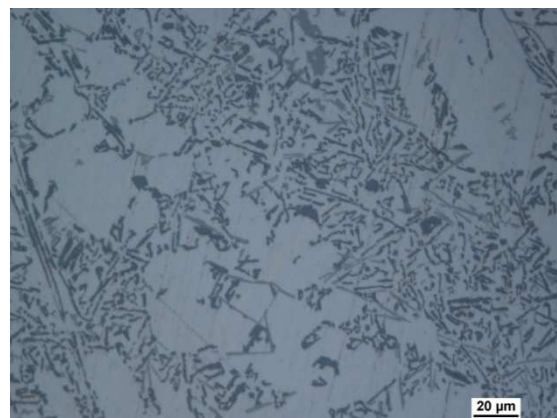


Obr. 11 Vzorek 1W, 500x zvětšeno, PL

U vzorku 1Z (obr. 12, 13) byla zřejmě o něco vyšší ochlazovací rychlost než u vzorku 1W, protože dendritická struktura je zde o něco jemnější. Eutektikum pomalu přechází z jehlicovitého tvaru na zrnitý, i když jeho protáhlost v jedné ose zatím stále převažuje.

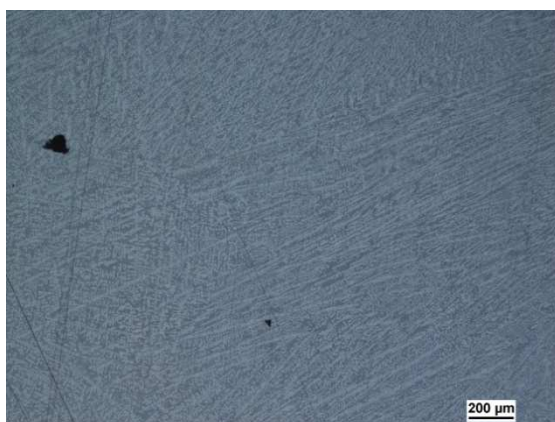


Obr. 12 Vzorek 1Z, 50x zvětšeno, PL

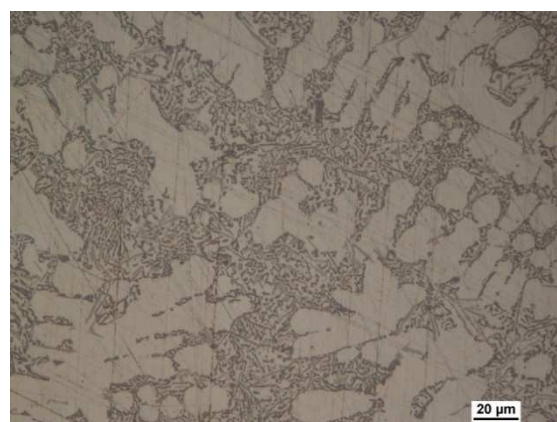


Obr. 13 Vzorek 1Z, 500x zvětšeno, PL

Vzorek 2W se vyznačuje největší délkou dendritů a jejich značnou hustotou, jak můžeme vidět na obrázku 14 a 15. Z toho se dá usuzovat o nejvyšší rychlosti tuhnutí. Délka dendritů je zde největší ze všech pozorovaných vzorků. Eutektikum je již téměř zrnité, i když stále mírně protáhlé.

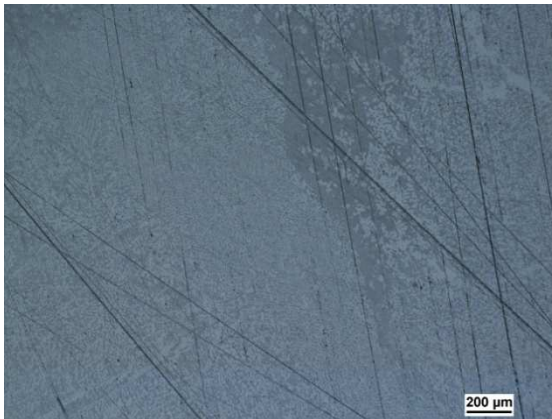


Obr. 14 Vzorek 2W, 50x zvětšeno, PL

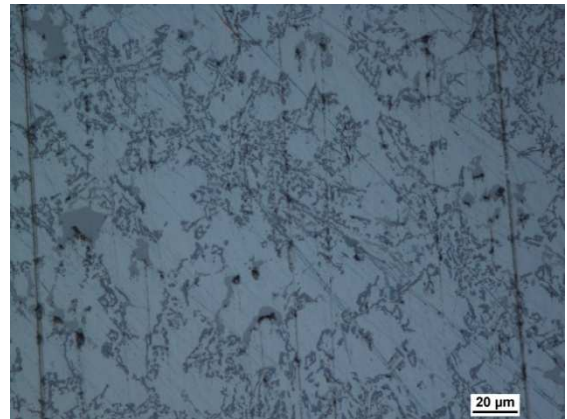


Obr. 15 Vzorek 2W, 500x zvětšeno, PL

U vzorku 2Z (obr. 16, 17) ztrácejí dendrity při 50-ti násobném zvětšení svoji protáhlou strukturu a přecházejí spíše v jemnější a méně uspořádanou směs. Eutektikum je stále mírně jehlicovité, ale začíná se zakulacovat.

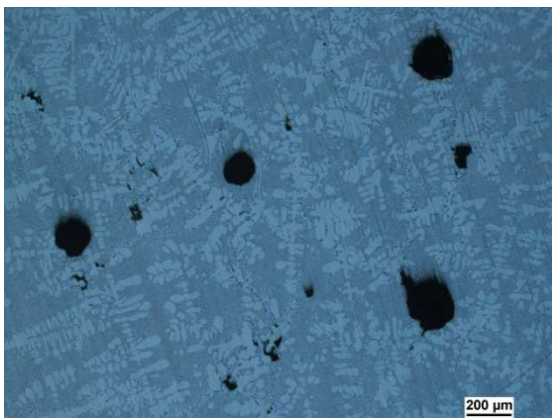


Obr. 16 Vzorek 2Z, 50x zvětšeno, PL

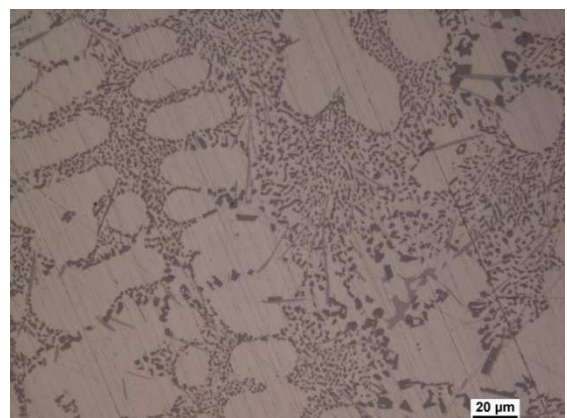


Obr. 17 Vzorek 2Z, 500x zvětšeno, PL

Vzorek 3W (obr. 18, 19) vykazuje v porovnání s předchozím vzorkem poměrně hrubou dendritickou, stroměčkovitou strukturu. Tím se mírně podobá vzorkům 1W a 1Z. Eutektikum je již zrnité.

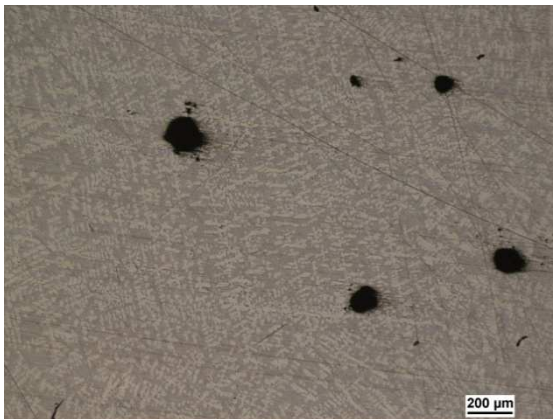


Obr. 18 Vzorek 3W, 50x zvětšeno, PL

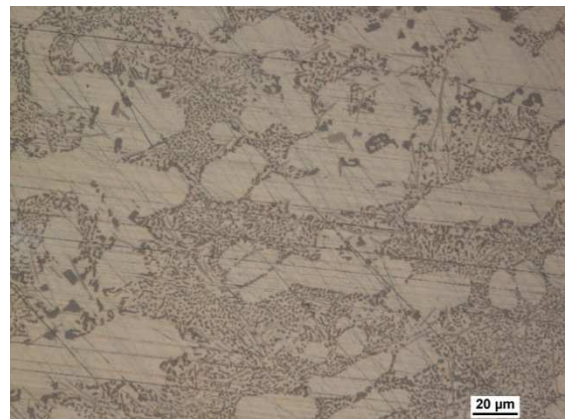


Obr. 19 Vzorek 3W, 500x zvětšeno, PL

Vzorek 3Z (obr. 20, 21) má eutektikum zrnité, hustota teček je vyšší než u předchozího vzorku, přičemž je zároveň jemnější, stejně tak jako je jemnější i jeho dendritická struktura.



Obr. 20 Vzorek 3Z, 50x zvětšeno, PL

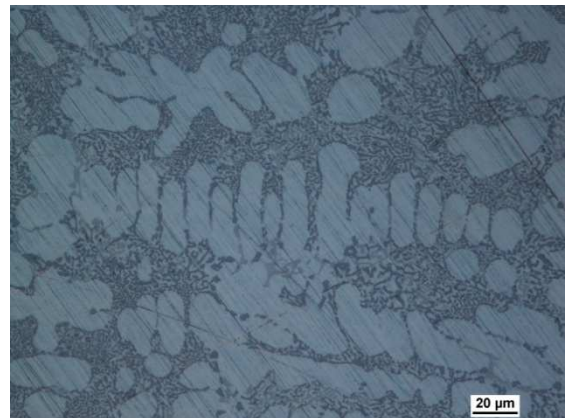


Obr. 21 Vzorek 3Z, 500x zvětšeno, PL

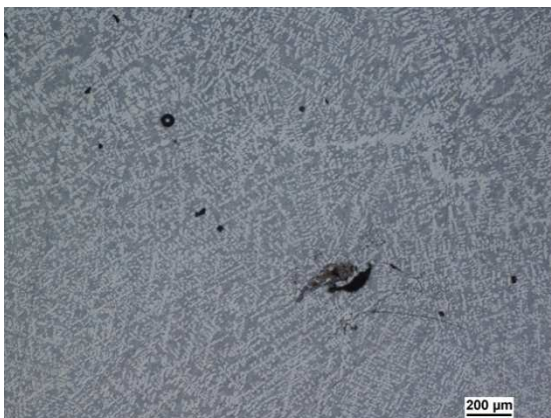
U vzorku 4W (obr. 22, 23) vidíme opět dendrity ve tvaru kratších jehlic, které jsou mírně jemnější než u vzorku 4Z (obr. 24, 25), jinak se do značné míry podobají. Stejně tak se se podobá i struktura eutektika u vzorků 4W a 4Z.



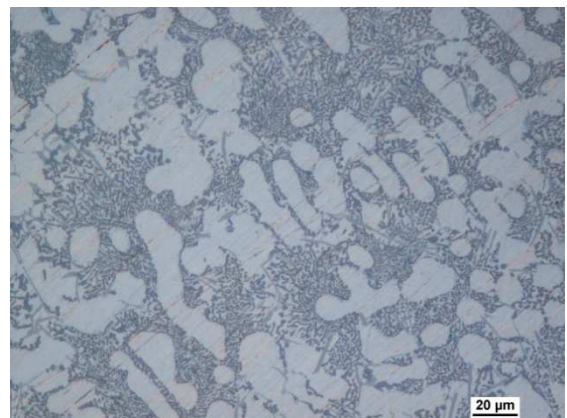
Obr. 22 Vzorek 4W, 50x zvětšeno, PL



Obr. 23 Vzorek 4W, 500x zvětšeno, PL



Obr. 24 Vzorek 4Z, 50x zvětšeno, PL



Obr. 25 Vzorek 4Z, 500x zvětšeno, PL



7.1 Shrnutí pozorování

Vzorky 1W a 1Z se tedy značně podobají jehlicovitým tvarem eutektika, přičemž u vzorku 1Z jsou jehlice kratší a jejich četnost je vyšší.

Seřazení vzorků dle hrubosti eutektika od nejhrubšího po nejjemnější:

1. 1W
2. 1Z
3. 2Z
4. 2W, 4W, 4Z
5. 3W
6. 3Z

Tvar eutektika: 1W, 1Z, 2Z mají eutektikum tyčkovité
 2W, 3W, 3Z, 4W, 4Z mají eutektikum zrnité

Seřazení vzorků dle délky jehlic dendritů od nejdelších po nejkratší:

1. 2W
2. 1W, 1Z, 3W, 3Z, 4W, 4Z
3. 2Z

Seřazení vzorků dle hrubosti jehlic dendritů od nejhrubších po nejjemnější:

1. 1W, 3W
2. 1Z, 3Z
3. 4W, 4Z
4. 2W
5. 2Z

Velikost pórů:

průměrná velikost: 140μm

maximální velikost: 176μm (3W)



Různé délky dendritů, jejich odlišná hrubost, dále také odlišná zrnitost a hrubost eutektika byla způsobena rozdílnou ochlazovací rychlostí při tuhnutí jednotlivých vzorků a dále také odlišným způsobem odlévání (pod tlakem/gravitačně).

Vzorky 3W, 3Z, 4W a 4Z mají jemnější eutektikum než ostatní vzorky. Této jemnější struktury bylo dosaženo přidáním modifikátoru (v tomto případě se jednalo o stroncium). Stroncium jako očkovač ovlivnilo tvar eutektika, modifikované vzorky mají eutektikum zrnité, nemodifikované vzorky mají eutektikum jehlicové.



8 Určení porózity metalografickou metodou

Zjištění porózity metalografickou metodou patří mezi metody destruktivní. Tato metoda byla použita pro ověření správnosti měření pomocí nedestruktivních metod. Měření probíhalo na vzorcích, které byly odebrány z koncových částí jednotlivých obrobených odlitků.

8.1 Příprava vzorků

Vzorky byly odříznuty z koncových částí jednotlivých obrobených odlitků za přítomnosti procesní kapaliny, aby nedošlo k jejich tepelnému ovlivnění. Řezání probíhalo na přístroji Delta Manual Abrasive Cutter. Následně byly zality do dentakrylu na přístroji Buehler Simplimet 2. Poté byly vzorky broušeny, přičemž počáteční velikost zrn brusného kotouče byla 35 mikrometrů, následně 22 mikrometrů, poté 15 mikrometrů a na závěr 10 mikrometrů. Nakonec probíhalo leštění vzorků pomocí diamantové brusné pasty s průměrem abrazivních zrn 0,7 mikrometru. Broušení probíhalo na přístrojích Buehler Alpha a Buehler MetaServ 3000, leštění pak na přístroji značky MTH.

8.2 Měření porózity

Porózita byla měřena u každého vzorku vždy na dvou místech a to u povrchu vzorku a ve středu vzorku, tedy v místě, kudy prochází tepelná osa vzorků. Měření probíhalo na ploše o rozměrech 3x3 milimetry.

Povrch vzorků byl snímán na optickém mikroskopu NEOPHOT 32 jenž byl opatřený digitálním fotoaparátem NIKON COOLPIX 4500. Při snímání povrchu vzorků bylo použito padesátinásobné zvětšení.

Nasnímané fotografie byly následně zpracovány pomocí systému analýzy obrazu NIS - Elements, přičemž bylo nutné rozlišit reálné póry ve slitině od vad povrchu, které vznikly při přípravě vzorků. Slitina AlSi11 má nízkou tvrdost a proto byly vzorky při leštění velice náchylné na tvorbu škrábanců. Nicméně právě tyto povrchové vady se



podařilo v nastavení programu eliminovat tak, že byla měřena právě jen reálná porózita slitiny. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 10.

| označení vzorku | zjištěná porózita [%] | |
|-----------------|-----------------------|--------------|
| | střed vzorku | okraj vzorku |
| 1W | 1,3 | 1,2 |
| 1Z | 0,2 | 0,2 |
| 2W | 0,02 | 0,02 |
| 2Z | 0,1 | 0,02 |
| 3W | 1,1 | 1,2 |
| 3Z | 1,1 | 0,5 |
| 4W | 0,006 | 0,02 |
| 4Z | 0,03 | 0,2 |

Tab. 10 *Porózita vzorků zjištěná metalograficky*



9 Zkouška tvrdosti vzorků

Tvrdost materiálu bereme jako odolnost jeho povrchu vůči porušení cizím tělesem. Tvrdost však není fyzikálně definovatelnou vlastností, nýbrž se jedná o sled několika vlastností materiálu.

Zkoušky tvrdosti materiálu dělíme dle několika kritérií. Pokud je indentor zatížen klidnou silou, jedná se o zkoušky statické. Je-li zkoušený předmět zatíženou rázem, pak se jedná o zkoušky tvrdosti dynamické. Podle velikosti tlaku pak zkoušky tvrdosti dělíme na zkoušky makrotvrdosti a mikrotvrdosti (například pro zkoušení tenkých folií atd.) Dále existují například zkoušky za zvýšené okolní teploty, tedy zkoušky creepové.

Nejčastějšími statickými zkouškami tvrdosti materiálu je zkouška dle Brinella, Vickerse či dle Rockwella. Při zkoušce dle Brinella (HB) se používá indentor kulového tvaru a následně se měří průměr vtisku. Tato zkouška je tedy vhodná například pro zkoušky tvrdosti litin či jiných nehomogenních materiálů, protože se zamezí změření tvrdosti například pouze měkké či tvrdší oblasti povrchu vzorku, jak by se mohlo stát například při měření nehomogenního materiálu Vickersovou metodou, kde má indentor tvar jehlanu. Měření tvrdosti dle Vickerse (HV) se používá jak pro měkké, tak i pro tvrdé materiály. Indentorem u této zkoušky je tedy diamantový čtyřboký jehlan, jehož vrcholový úhel je 136° . U této metody jsou pro různé materiály vyhrazeny různé zatěžovací síly a rozdílné jsou i doby zatěžování zkoumaného materiálu. Pro určení tvrdosti pak změříme délku úhlopříček vtisku a výslednou tvrdost odečteme v tabulkách. Rockvellova zkouška tvrdosti (HRA, HRB, HRC) se od předchozí liší tím, že se měří hloubka vniku indentoru do materiálu. Indentor vniká do materiálu pod přesně stanovenou silou. Tato zkouška se dále dělí podle tvaru vnikajícího tělesa na HRA, kdy má indentor tvar kužele s vrcholovým úhlem 120° a vniká do materiálu pod silou 600N. Pokud použijeme kalenou kuličku o průměru 1,6 mm, pak tuto metodu značíme HRB, zatěžovací síla je zde 1000N. Při metodě HRC má indentor opět tvar diamantového kužele, ovšem zatěžovací síla je již 1500N. HRA se jako nejméně invazivní metoda hodí pro měření tvrdosti tenkých vrstev či křehkých materiálů, HRB pro měření měkkých a středně tvrdých materiálů a HRC pro měření tvrdých materiálů.

Dynamické zkoušky pak existují v zásadě dvojího druhu. Buď měříme míru deformace materiálu, nicméně zatížení je provedeno rázem nebo měříme výšku, do jaké



se odrazí indentor, nechá-li se na povrch měřeného vzorku spadnout z určité výšky. Dynamické vnikací zkoušky mohou být prováděny na příklad pomocí Poldi kladívka. Metoda Poldi kladívka je založená na porovnání deformace po úderu kladívka u zkoušeného materiálu a u materiálu, jehož tvrdost je známa. Zkouška odrazová se provádí pomocí Shoreho skleroskopu, přičemž výška odrazu závisí na modulu pružnosti materiálu. Porovnávat lze tedy pouze materiály s podobným modulem pružnosti. Indentor, jehož konec tvoří kulovitě zabroušený diamant má hmotnost zhruba 2,5 g, padá z výšky 254 mm, stupnice je rozdělena na 140 dílků přičemž sto dílků odpovídá tvrdosti kalené oceli.

Pro měření zkoumaných vzorků byla použita metoda měření tvrdosti dle Vickerse s konstantním zatížením 5kg. Doba zatěžování byla 60 sekund. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce číslo 11. Tvrdost byla měřena jak u okraje vzorku tak i uprostřed, tvrdosti se však shodovali.

| označení vzorku | tvrdost HV5 |
|-----------------|-------------|
| 1W | 58,7 |
| 1Z | 59,7 |
| 2W | 64,7 |
| 2Z | 67,7 |
| 3W | 58,0 |
| 3Z | 58,5 |
| 4W | 66,1 |
| 4Z | 64,3 |

Tab. 11 *Tvrdost vzorků dle Vickerse (HV5), zatěžovací síla 5kg, doba zatěžování 60 sekund*

Z naměřených hodnot vyplývá, že se tvrdost vzorků poměrně liší, až o 10%, což bylo způsobeno různým způsobem odlévání (pod tlakem/gravitačně). Vzorky 2W, 2Z, 4W a 4Z byly odlévány pod tlakem 60MPa a vykazují maximální tvrdost. Ostatní vzorky byly odlévány gravitačně a tvrdost je nižší v průměru o 7 HV5.



10 Diskuze

Tato bakalářská práce měla za cíl určit vztah mezi porózitou slitin hliníku a akustickým útlumem ultrazvuku.

Měření probíhalo na přístroji Dio 562 odrazovou metodou. K tomuto přístroji byly postupně připojeny dvojité ultrazvukové sondy o frekvenci 1, 2, 4 a 10MHz a měřil se akustický útlum ultrazvuku, přičemž použitelných výsledků se dosahovalo při použití 4MHz sondy. Pokud bude frekvence nižší, bude větší vlnová délka a ultrazvukový paprsek tak nebude reagovat na vady v materiálu, pouze jím projde, bude tedy nízká rozlišovací schopnost. Pokud bude frekvence naopak příliš vysoká, bude vysoká i rozlišovací schopnost ultrazvuku a paprsek se tak rozptýlí o překážky, u kterých nepotřebujeme, aby na ně reagoval. Měření o frekvenci 4MHz se ukázalo tedy jako ideální a lze jej doporučit.

Dále byla také měřena rychlost pronikání ultrazvukových vln materiálem, kde se předpokládalo, že čím vyšší bude poróza vzorku, tím nižší bude rychlost ultrazvukového paprsku. Tento předpoklad se však nepotvrdil. Rychlost ultrazvukových vln může být ovlivněna například velikostí pórů, v nichž se bude ultrazvukový svazek šířit rychleji než v kovu a může se tak vykompenzovat snížení rychlosti paprsku na rozhraní pór/kov.

Výhody odrazové metody měření ultrazvukem, která byla při měření použita, spočívají v možnosti měření vzorků, jejichž povrchy nejsou rovnoběžné. Odpadá zde totiž nutnost použití druhé sondy - přijímače, která by musela být přiložena na povrchu rovnoběžném s povrchem, k němuž je přiložena sonda – emitor. Dále se tato metoda s výhodou využívá pro přesné měření paralelních ploch.

Dále byla měřena poróza vzorků metalografickou metodou, kdy byly vyrobeny výbrusy jednotlivých vzorků a jejich povrch se snímal na optickém mikroskopu NEOPHOT 32. Tyto snímky byly následně zpracovány pomocí softwaru pro analýzu obrazu NIS – Elements a byla tak určena reálná poróza vzorků. Poté bylo možné určit vztah reálné porózy a akustického útlumu ultrazvukového paprsku a vytvořit tak matematický model, pomocí kterého můžeme určit hodnotu teoretické porózy z hodnoty akustického útlumu.



K porovnání správnosti metalograficky naměřené porózity a míry porózity určené ultrazvukem nadále sloužily hodnoty porózity, které byly určeny pomocí metody hydrostatického vážení. Tyto hodnoty se podařilo získat z Politechniky Czestochovské v Polsku od pana dr inž Andrzeje Zysky a jsou uvedené v tabulce číslo 12.

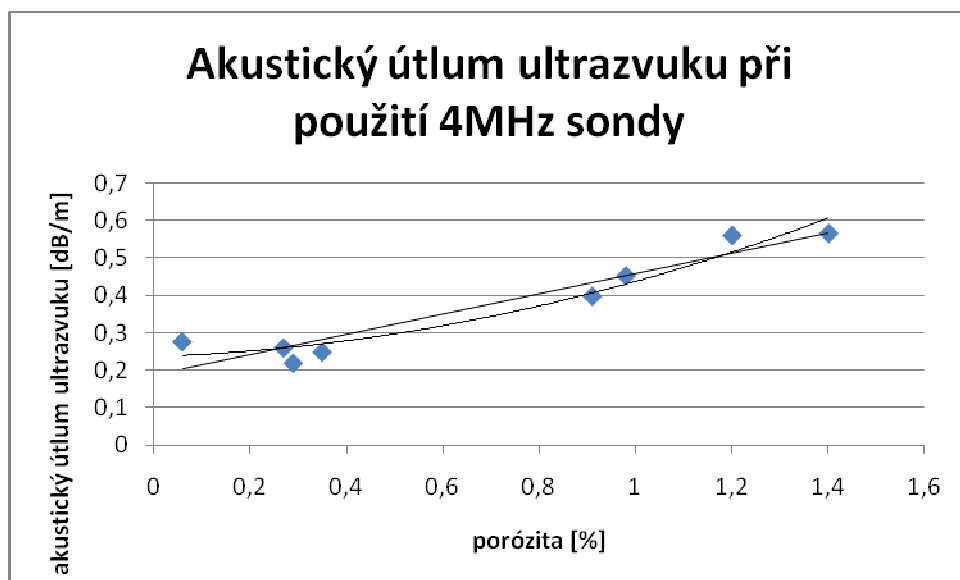
| označení vzorku | porózita [%] (metalografická metoda) | porózita [%] (metoda hydrostatického vážení) | rozdíl porózity |
|-----------------|---|--|------------------|
| 1W | 1,25 | 1,2 | 0,05 |
| 1Z | 0,2 | 0,91 | 0,71 |
| 2W | 0,02 | 0,27 | 0,25 |
| 2Z | 0,06 | 0,29 | 0,23 |
| 3W | 1,15 | 1,4 | 0,25 |
| 3Z | 0,8 | 0,98 | 0,18 |
| 4W | 0,013 | 0,06 | 0,047 |
| 4Z | 0,115 | 0,35 | 0,235 |
| | | | $\Phi = 0,244\%$ |

Tab 12 Rozdíl hodnot porózity naměřené metodou metalografickou a metodou hydrostatického vážení

Rozdíl hodnot naměřených pomocí těchto dvou metod činí 0,244% a mohl být způsoben nepřesnostmi v měření vycházejících z použitých metod. U ultrazvukové metody to mohly být například rozdíly ve struktuře v průřezu vzorku, metoda hydrostatického vážení pak mohla být ovlivněna například nepřesnostmi ve výpočtu objemu vzorků. U metody metalografické pak rozdíl mohlo způsobit nerovnoměrné rozložení pórů v materiálu.

Graf číslo 5 zobrazuje závislost akustického útlumu při měření 4MHz sondou a hodnot porózity získaných z Politechniky Czestochowské. Rozdíl korelačních koeficientů při použití těchto hodnot a hodnot naměřených metalograficky je minimální. Při použití lineární závislosti je zhruba o jednu desetinu nižší ($R = 0,955$), použijeme-li

polynomicou funkcí k popisu této závislosti, vyjde koeficient korelace vyšší o zhruba jednu setinu ($R = 0,971$).



Graf 5 Vztah porózity a akustického útlumu při použití 4MHz sondy. Hodnoty porózity převzaty z měření na Politechnice Częstochowské.

Dále byla také zkoumána struktura vzorků. V tomto případě byly vzorky zkoumány na optickém mikroskopu EPIPHOT 200 v polarizovaném světle, kdy struktura vzorků vynikla nejlépe. Zde se ukázalo, že u vzorků 3W, 3Z, 4W a 4Z má eutektikum jemnější zrnitou strukturu, což bylo způsobeno přidáním stroncia do taveniny jako modifikátoru. Nemodifikované vzorky mají eutektikum hrubší a jehlicovité. Také se zde ukázala rozdílná struktura dendritů, což bylo opět částečně způsobeno přidáním modifikátoru ale pravděpodobně také různou ochlazovací rychlostí vzorků či způsobem odlévání, protože zde již není natolik ostrá hranice u modifikovaných a nemodifikovaných vzorků. Z pozorování také vyplynulo, že čím nižší byla hrubost dendritů, tím vyšší byla tvrdost vzorku (např. vzorek 2Z vykazuje maximální tvrdost a nejjemnější strukturu dendritů, vzorek 3W je naopak tvořen hrubými dendrity a jeho tvrdost je minimální).



Závěr

Tato bakalářská práce měla za cíl zjistit vztah porózity a akustického útlumu u hliníkových slitin. Veškerá měření probíhala na vzorcích z materiálu AlSi11, které byly odlity katedrou slévárenství na polské Politechnice Czestochowské. Vzorky byly speciálně připraveny a odlévány tak, aby měly v celém jejich objemu konstantní porózu.

Z předpokladu konstantní porózity se také vycházelo při stanovení vztahu porózity a akustického útlumu u těchto slitin, kdy byla poróza vzorků stanovena metalograficky pomocí softwaru analýzy obrazu NIS – Elements. Dále byl změřen akustický útlum ultrazvuku u jednotlivých vzorků a zkoumal se vztah takto naměřené porózity a akustického útlumu a byl vytvořen matematický model ve tvaru $x = 3,049 \cdot (y - 0,2004)$ kde x představuje hodnotu porózity a y hodnotu akustického útlumu. Tento vztah platí při měření dvojitou sondou o frekvenci 4MHz, která se ukázala pro určení míry porózity slitin hliníku a hořčíku jako nejpřesnější a lze ji tedy doporučit při určování porózity tohoto materiálu pomocí akustického útlumu.

Zjištění porózity materiálu tímto způsobem pomocí zjištěného matematického modelu můžeme s výhodou aplikovat například při automatické kontrole odlitků či při kontrole odlitků, kde by bylo finančně příliš náročné určovat jejich porózu destruktivními metodami.



Použitá literatura

- [1] DORAZIL, E.: *Nauka o materiálu I*. 1. vydání. Nakladatelství VUT: Brno 1989. ISBN 80-214-1028-0.
- [2] KOPEC, B., a kol.: *Nedestruktivní zkoušení materiálu a konstrukcí*. 1. vydání. CERM akademické vydavatelství: Brno 2008. ISBN-978-80-7204-591-4.
- [3] OBRAZ, J.: *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. 1. vydání. SNTL: Praha 1989. ISBN 80 – 03 – 00097 – 1.
- [4] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu*. 1. vydání. Nakladatelství CERM s. r. o.: Brno 1999. ISBN 80 – 7204 – 130 – 4.
- [5] PTÁČEK, L., MÍŠEK, B.: *Zkoušení materiálů a výrobků bez porušení*. 1. vydání. Vydalo nakladatelství SNTL: Praha 1968.
- [6] ROUČKA, J.: *Metalurgie neželezných kovů*. 1. vydání. Nakladatelství CERM s. r. o.: Brno 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [7] ŠVEC, M.: *Výzkum porózity kovových soustav v práškové metalurgii metodami nedestruktivního testování*. KMT B141, bakalářská práce, TU v Liberci 2009.
- [8] VĚCHET, M., KESL, J., ŠPIKA, L., EDER, V.: *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. SNTL: Praha 1989. ISBN 80-03-00100-5.